Vol.2014-HCI-160 No.20
Vol.2014-UBI-44 No.20
2014/10/15

マップマッチングを用いたPDR軌跡補正

吉見 駿[1,a)]　村尾 和哉[2]　望月 祐洋[3]　西尾 信彦[2]

概要：屋内測位手法の一つとして，センサによる歩幅 · 歩数 · 進行方向の推定結果を用いて測位開始地点からの相対的な測位を行う歩行者向けデッドレコニング（PDR）の研究が盛んである．PDR には時間とともに測位誤差が蓄積するという問題があり，その原因として，障害物の回避などで歩容が変化した際に歩幅と進行方向の推定誤差が増大する点が挙げられる．測位誤差の補正には一般的にマップマッチングが用いられるが，通路上の細かな移動軌跡の情報が失われてしまい，例えば PDR による測位結果をライフログに用いる際，ユーザのいる通路の左右に店舗が並んでいる場合において，ユーザがどちらの店舗に立ち寄ろうとしたのか分からず，ユーザの興味をマイニングできないという問題が出てくる．そこで，施設内の壁や通路の形状など建築構造情報を活用して歩幅 · 進行方向を推定する係数を較正することで，PDR によって推定した移動軌跡を実際の移動軌跡に近い尤もらしい軌跡に補正する屋内歩行者向けのマップマッチング手法を提案した．測位誤差の評価実験により，PDR の推定軌跡に提案手法を適用することで平均測位誤差が 6.76m から 0.57m に向上した．

キーワード：PDR，屋内測位，マップマッチング，移動軌跡，軌跡補正

1. はじめに

近年，位置情報サービスの普及に伴い，GPS の衛星波が届かない屋内での測位手法の研究が盛んに行われている．屋内測位には Wi-Fi や RFID などの外部インフラを用いる手法 [1] が一般的であるが，広範囲で測位を行うとなると，インフラの設置や維持・管理にコストがかかるという問題がある．そこで，外部インフラを用いない屋内測位手法として PDR(Pedestrian Dead Reckoning) を用いた研究がなされている [2][3]．PDR とはスマートフォンなどの端末に搭載された加速度センサやジャイロスコープなどのセンサ群を利用して歩数 · 歩幅 · 一歩ごとの進行方向を推定することで測位開始地点からの相対的な測位を行う技術である．しかし，PDR は相対的な測位であるため時間とともに歩幅や進行方向の推定誤差が蓄積し，長距離移動の測位には不向きである．絶対位置が取得できれば位置補正により蓄積誤差をリセットできるが，基地局などの外部インフラが十分配置されており，絶対位置取得が可能である場所は限られており，それ以外の場所での補正は困難である．そこで，高精度な屋内測位の実現のためには歩幅や進行方向をの補正が考えれらる．しかし，歩幅は路面状態や混雑具合など利用者の周囲の状況の様々な要因によって大きく変動する [4] ため，歩幅のモデル化は困難である．また，進行方向においてもセンサのノイズや精度の問題から一定の誤差が生じ，中でもジャイロスコープは温度によって誤差率が変化するため補正が困難である．これらの要因から高精度な PDR 測位は実現していない．

そこで，外部インフラを用いずに PDR の測位誤差を定期的に補正する手法としてマップマッチングという技術を用いることが考えられる．マップマッチングは，カーナビなどで利用されている技術で，測位地点から付近の道路ネットワーク上へマッチングを行う補正技術である．自動車は GPS によっておおよその絶対位置が推定できる上に，高性能なセンサが搭載されているため高精度なデッドレコニングが可能である．また，基本的に道路上を決められた通りにしか走らないという前提があるためマップマッチングは有用な手段である．マップマッチングは PDR に対しても歩行可能な通路を線で表現した歩行空間ネットワークを事前に用意しておくことで活用できる．しかし，人（PDR のユーザ）は自動車と異なり通路上を自由に歩き回ることができるため，線で表現された通路上の点にしか補正されない

[1] 立命館大学大学院 情報理工学研究科
Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University
[2] 立命館大学 情報理工学部
College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University
[3] 立命館大学 総合科学技術研究機構
Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University
[a)] shun@ubi.cs.ritsumei.ac.jp

© 2014 Information Processing Society of Japan

Vol.2014-HCI-160 No.20
Vol.2014-UBI-44 No.20
2014/10/15

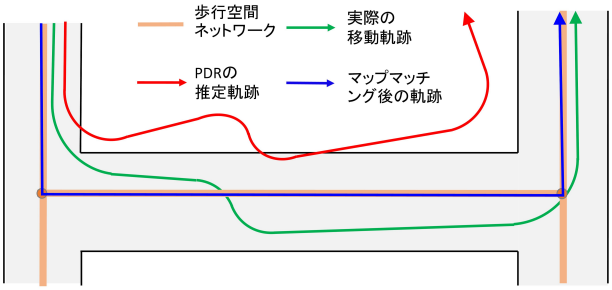

図 1　従来手法によって得られる軌跡

マップマッチングではユーザの実際の軌跡の特徴が失われるという欠点がある．例えば PDR による測位結果をライフログに用いる際，ユーザのいる通路の左右に店舗が並んでいる場合において，軌跡を通路の中央に補正するマップマッチングではユーザがどちらの店舗に立ち寄ろうとしたのか分からない．そのため，ユーザの興味をマイニングできないという問題が出てくる．また，道幅の細い直線の通路ではユーザの動き方がある程度制限されるが，広場のようなユーザが自由に動き回れる場所では，ユーザの軌跡を歩行空間ネットワークで表現するのが困難であり，マップマッチングによる軌跡の補正が正しく行えないという問題がある．

そこで，本稿では PDR の測位精度の向上を目的とし，PDR で推定した軌跡を実際の軌跡に近い尤もらしい軌跡へ補正する手法を提案する．具体的には，例えば図 1 で示すような軌跡で移動した際，PDR による推定軌跡には誤差が生じ，壁の中を移動するような実際には起こりえない軌跡となっている．このとき，従来のマップマッチングを用いて歩行空間ネットワーク上に合わせるような補正を行うと通路内に収まるように補正されるが，交差点でのゆるやかな曲りや通路内で左右へ動くような動作による軌跡の特徴が失われてしまう．そこで，通路内に収まりつつ実際の軌跡の特徴を残した尤もらしい軌跡に補正を行い，さらに軌跡の補正に用いた情報を以降の PDR で活用することで高精度な屋内測位を実現する．また，実環境での移動軌跡データを用いて評価実験を行い，提案手法によって測位誤差を大幅に削減できることを確認した．

本稿は 5 章で構成される．以下，2 章では PDR のにおける歩幅・進行方向の推定や，位置補正手法の関連研究を述べる．3 章では提案システムを説明し，4 章で評価実験について述べる．最後に 5 章で結論と今後の展望について述べる．

2. 関連研究

本章では現状の PDR や，その補正技術に関する研究を紹介し，問題点を述べる．

2.1 PDR の誤差補正

PDR の測位誤差は歩幅と進行方向の推定誤差が測位誤差に大きな影響を与える．それぞれの推定誤差の補正技術および測位誤差の補正技術を紹介する．

2.1.1 歩幅の推定誤差補正

従来 PDR に用いられる歩幅は，自然な歩行を前提として事前に直接歩幅を入力するか，身長などのパラメータを用いた簡易的な歩幅推定式を用いた固定長を用いることが多い [5]．しかし，実際には同じ歩行者であっても歩幅は一定ではなく，身に付けている物や路面状態，人の混雑具合，同行者の有無など様々な影響を受ける．これらの影響を考えると固定長の歩幅では精度が不十分である．

これに対して上坂らは，正確に測定した歩幅を教師信号として，歩行者の身長の他に，歩調や歩行一周期における加速度の最大最小の誤差などを訓練データとして機械学習を行い歩幅を動的に推定する手法を提案している [3]．しかし，ユーザ毎に事前の学習が必要であるため一般的なナビゲーションアプリなどへの適用は現実的ではない．

これに対して三宅らは，時間帯や同行者の有無によっても歩幅が変化することに着目し，状況に応じてパラメータを自動で調整して推定精度を向上させる手法を提案している [6]．具体的には，PDR 開始前に GPS を用いて推定した歩幅を教師信号とし，従来の歩幅推定式による歩幅と合うようにパラメータ調整を行っている．地上で 200m 以上の歩行があれば GPS を用いて推定した歩幅が安定した値を示すと述べられているため，PDR 開始直前の歩行の学習も容易である．しかしながら，PDR 中の路面状況の変化や障害物回避時などによる歩幅の変化に対処できないという問題がある．

2.1.2 進行方向の推定誤差補正

進行方向の推定には地磁気センサを用いた手法が一般的であるが，PDR の利用場面のほとんどは地磁気センサが正常に動作しない屋内であるため，代わりにジャイロスコープから取得した角速度値を積分することで相対的な進行方向の変化を推定する手法が主流になりつつある．しかし，ジャイロスコープはドリフトと呼ばれる誤差や歩行動作などによるノイズの影響により一定の誤差を含んでしまう．特に，ドリフト誤差は温度によっても変化するため，あらかじめオフセット誤差を調べるだけでは長期的な誤差に対応できない．これらの理由からジャイロスコープのみでの正確な進行方向の推定は困難とされている．

これに対して田川らは，歩行時の振動に伴い発生する角速度を誤差とみなしたカルマンフィルタモデルを用いて進行方向の誤差を低減する手法を提案している [7]．しかしながら，曲進時は角速度が正規分布に従わないため適用できないという問題がある．

2.1.3 蓄積誤差の補正

PDR は相対的な測位であるため，移動距離が長くなる

© 2014 Information Processing Society of Japan

ほど蓄積誤差が大きくなるという問題がある．高精度な測位を行うには蓄積誤差の対策として定期的な位置補正が必要とされている．

筆者らはこれまでに，PDR を対話型のナビゲーションに適用することにより位置補正を行う手法を提案している [8]．この研究では，ナビゲーション中のユーザは指示に従って寄り道をせずに直進し，交差点でのみ右左折するという前提のもと，進んだ距離と曲がった箇所にのみに注目した簡易的な PDR を行っている．ナビゲーションにおいて重要となる地点の周辺の施設情報を用いた案内を行い，システムとユーザが対話を行うことで目印の視認性を用いて絶対位置の確認及び補正を行うものである．しかし，視認性を確認する対話を必要とするため汎用性が低く，ナビゲーション以外の位置情報サービスでの利用は困難である．

石塚らは BLE シグナルと PDR を用いたハイブリッド測位手法を検討している [9]．測位精度が不安定な無線 LAN 測位と，絶対位置による補正が必要である PDR がお互いの欠点を補うことで屋内測位における測位精度の向上と利便性の向上において有効であると述べている．しかし，この論文では BLE 基地局が十分な数配置されている場所で実験を行っており，基地局が設置されていない場所での活用は難しいと考えられる．

このように，絶対位置による補正がどこでもできるわけではないので何かしらの制約に基づいて補正を行うことが考えられる．例えば自動車の場合，カーナビ利用時において GPS 測位結果に道路上におさまらない誤差があるときは自動車は基本的に道路に沿ってしか走らないという制約のもとマップマッチングが用いられる．マップマッチングとは，車に搭載されているセンサによりデッドレコニングした測位軌跡を周囲の道路と合うように補正する技術である [10]．しかし，PDR にマップマッチングを適用するとなると，自動車と違って歩行者は通路上や広場などを自由に歩き回れるため，単純に歩行空間ネットワーク上に補正するだけでは不十分な場合がある．また，相対的な測位であるため，一度間違ったリンクに補正してしまったら正しいリンクに補正しなおすのは困難である．これらの理由から以下のような場合に問題が生じる．

2.1.4　ライフログへの活用時の問題

推定した軌跡をライフログに活用し，ユーザの興味をマイニングする際，マップマッチングによる補正によって必要な情報が失われる可能性がある．例えば，図 2 のようにユーザがいる通路の両端に店舗群が並んでいて，ユーザが興味の持つ店 A，B の前を覗くように歩いたとする．ここでマップマッチングを用いてしまうと通路の中央をまっすぐ進んだように補正されてしまうため，ユーザがどの店舗の前を通ったのか分からず，ユーザの興味を拾うことができないという問題が生じる．

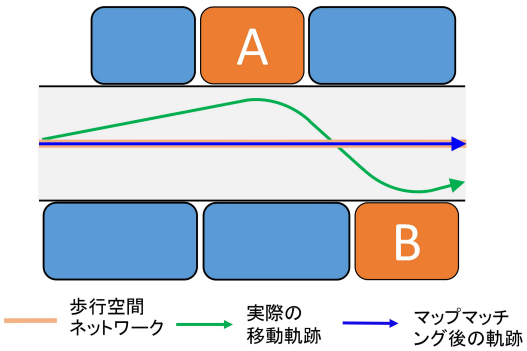

図 2　通路でのマップマッチング例

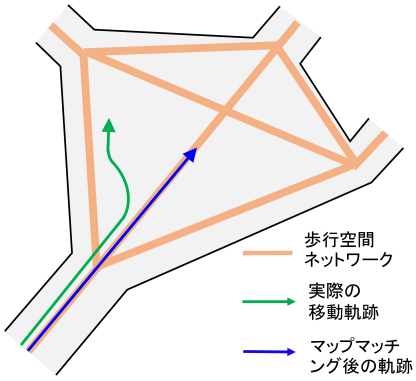

図 3　広場でのマップマッチング例

2.1.5　広場での活用時の問題

広場のようなユーザの歩行の自由度が高いエリアでのマップマッチングは困難である．例えば，図 3 のように広場の出入り口を網羅的にリンクさせた歩行空間ネットワークを生成したとする．この時，ユーザが出入り口間をまっすぐ移動せずに途中で曲がるように移動した場合，マップマッチングでは実際の軌跡とかけ離れたリンクに補正する恐れがある．このように，広場のようにユーザが異なるリンク間を自由に動き回れることができるエリアでは，歩行空間ネットワークでのユーザの自由な移動の表現が困難であり，マップマッチングによる補正が正しく動作しないという問題が生じる．このような問題に対し，広場などでの歩行空間ネットワークの生成方法について言及されている研究は，著者らの知る限り存在しない．

3.　提案手法

本章ではマップマッチングを用いて PDR で得られた道路上の移動軌跡を尤もらしい移動軌跡に補正する手法について述べる．提案手法は事前に用意した通路の道幅や長さから成る歩行空間ネットワークを用いており，基地局や衛星などの外部インフラを利用しない．

© 2014 Information Processing Society of Japan

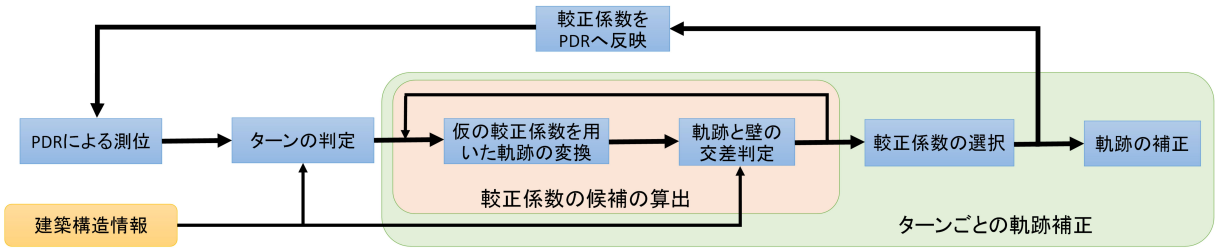

図 4　提案システムの処理フロー

3.1　システム概要

PDR の生の軌跡を尤もらしい軌跡に補正し，PDR の測位精度を向上させるためのシステムの概要について述べる．全体の処理の流れを図 4 に示す．PDR の測位誤差の主な原因である進行方向 · 歩幅の誤差率は状況によって変化するため，定期的な補正が必要となる．そこで，ユーザが交差点などで方向転換する（以下，ターン）ごとに進行方向と歩幅をそれぞれ係数を用いて補正を行い，ターン間に推定した軌跡を変換する．まず，建築構造情報を用いてユーザのターンの判定し，ターン間の軌跡を仮の較正係数を用いて変換する．また，建築構造情報を用いることで変換後の軌跡が実際にあり得る軌跡なのか判定を行う．この処理を繰り返し行うことで尤もらしい軌跡に補正するための較正係数の候補を算出する．算出した候補の中から実際に補正に用いる較正係数を選択し，ターン間における軌跡の補正を行う．さらに，選択した較正係数を PDR にも反映させることで以降の PDR の測位精度を向上させる．以下に詳細なアプローチを説明する．

3.2　PDR による測位

本研究で用いる PDR は，加速度センサとジャイロスコープが搭載されたスマートフォンを胸の前で手持ちで保持し，センサ情報を用いて歩数 · 歩幅 · 進行方向を推定することで測位を行う．歩数は加速度センサの 3 軸の値を合成し，ピークのセット（極大値と極小値）を見つけるごとに 1 歩と認識する．また，加速度センサの合成値をスムージングし，ピークのセットの差に閾値を適用することでセンサノイズなどによって発生する局所的なピークを取り除いている．

歩幅を動的に推定する手法として，歩幅 L が歩調 C（1 分間の歩数）に比例するという知見から得られた (1) 式を用いることが考えられる [6][11].

$$L = C \cdot r_c \tag{1}$$

ただし，比例定数 r_c は事前にユーザの通常時の歩幅と歩調を設定し，逆算により算出する．また，著者らは直進時と曲進時で歩幅が異なることに注目し，1 歩間の進行方向の変化量と歩幅の関係を調査した．その結果，通常時の歩幅に対する曲進時の歩幅の割合 $R(\%)$ が，1 歩間の進行方向変化量 θ 度に比例して減少するという知見が得られ，(2) 式に示す推定式を定義した．

$$R = 100 - a \cdot \theta \tag{2}$$

このときの係数 a は被験者を用いた実験から 1.124 とした．最終的な歩幅推定式は (1)(2) 式を用いて (3) 式とする．

$$L = R \cdot C \cdot r_c \tag{3}$$

進行方向は水平方向の角速度を積分することで算出する．加速度センサの合成ベクトルが重力方向に近似することから端末の傾きを取得し，ジャイロスコープの軸を補正することで水平方向の角速度を算出する．また，進行方向の変化が閾値以下の場合は直進中における推定誤差であるとみなし，進行方向の変化量を 0 にする．進行方向の変化が閾値以上の区間は曲進しているとみなす．

3.3　マップマッチングを用いたターンの判定

ユーザのターンごとに補正を行うため，ターンの認識が必要である．ユーザが曲進している区間（以下，曲進期間）は進行方向変化量を用いて判定することができるが，この曲進が交差点での方向転換なのか交差点以外における動作なのか判別がつかない．そこで，従来のマップマッチングを用いて通路の判定を行うことでターンを判定する．

従来のマップマッチングは，ノード（交差点の中心点）間を線（リンク）で繋ぐことで歩行可能な通路を表した歩行空間ネットワークが用いられる．推定された 1 歩の歩行をベクトル（1 歩前の推定位置から現在の推定位置）で表し，各リンクまでの距離と角度の類似度をスコアとして算出することで，ユーザがいると思われるリンクを推定する．さらに，推定位置から推定されたリンクに射影することで歩行空間ネットワーク上への補正を実現している．

マップマッチングを用いることでユーザの現在属するリンクが分かるため，曲進期間の前後で属するリンクが変わった場合，ターンと判定する．前後で同一リンクに属すると判定された場合は通路内での動作であると判定する．このようなターンを一つの区切りとしてターン間に推定した軌跡の補正処理を行う．

3.4　較正係数を用いた軌跡の変換

PDR に用いる進行方向と歩幅に対してそれぞれ較正係

© 2014 Information Processing Society of Japan

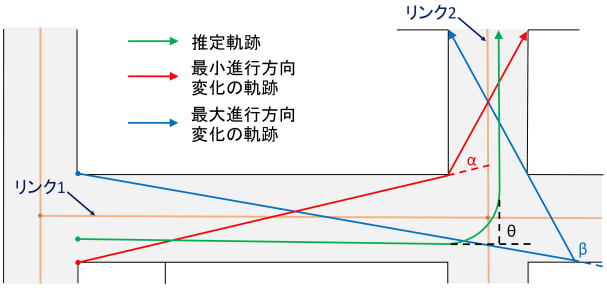

図 5　実際に取り得る進行方向変化

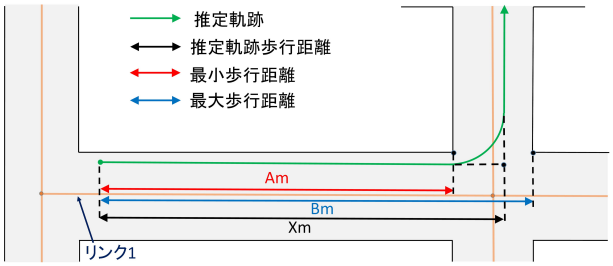

図 6　実際に取り得る歩行距離

数を用いることで軌跡の変換を行う．進行方向に対する較正係数 Rd は推定したある歩行における進行方向変化量（度）を係数倍に変換するものである．つまり，i 歩目における元の推定歩幅を θ_i とすると変換後の歩幅 θ'_i は式 (4) のように表す．

$$\theta'_i = \theta'_{i-1} + (\theta_i - \theta_{i-1}) \cdot Rd \tag{4}$$

歩幅に対する較正係数 Rs は推定した歩幅を係数倍に変換するものである．つまり，i 歩目における元の推定歩幅を L_i とすると変換後の歩幅 L'_i は式 (5) のように表す．

$$L'_i = L_i \cdot Rs \tag{5}$$

このように，元の軌跡を Rd と Rs の 2 種類の較正係数の組み合わせを用いて軌跡の変換を複数パターン試行する．

この時用いる較正係数の組み合わせは，実際の構造建築情報から Rd，Rs のそれぞれが実際に取りうる範囲を求めて総当たりで行う．

3.4.1　Rd の取りうる範囲

ある通路から隣接した通路に曲がった時の Rd の取りうる範囲について説明する．図 5 で示すようにリンク 1 の属する通路からリンク 2 の属する通路に曲がった時，取り得る進行方向変化量は，最小はアウト-イン-アウトの移動経路で α 度，最大はイン-アウト-インの移動経路で β 度である．この時，推定された軌跡の進行方向変化量が θ 度であったとすると Rd の取りうる範囲は式 (6) のように表すことができる．

$$\frac{\alpha}{\theta} \leq Rd \leq \frac{\beta}{\theta} \tag{6}$$

3.4.2　Rs の取りうる範囲

ある通路から隣接した通路に曲がった時の R の取りうる範囲について説明する．図 6 で示すようにリンク 1 の属する通路における，リンクへ射影した歩行距離は，最小は最も手前で曲がって Am，最大は最も奥で曲がって Bm である．この時，推定された軌跡の射影した歩行距離が Xm であったとすると Rs の取りうる範囲は式 (7) のように表すことができる．

$$\frac{A}{X} \leq Rs \leq \frac{B}{X} \tag{7}$$

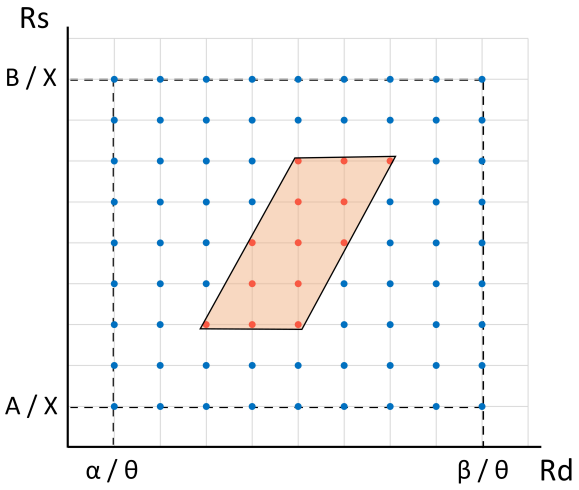

図 7　較正係数の組の取り得る範囲

3.5　軌跡と壁との交差判定

次に，変換後の軌跡の中から通路の壁と交差するような軌跡を取り除く．つまり，ある較正係数の組で変換後の軌跡と通路の壁とで当たり判定を行い，通路内に収まるような実際にあり得る軌跡に変換する場合は残し，通路からはみ出るようなあり得ない軌跡に変換する場合は取り除く．この時のあたり判定は，1 歩ごとの軌跡と通路をそれぞれ線分として表し，線分の交差判定を行うことで実現する．全ての較正係数の組み合わせに対して処理を行い，残った較正係数の組の範囲をグラフで表すと，図 7 のように凸方形を得られる．

3.6　較正係数の選択

このようにして求めた範囲の中に実際の歩幅 · 進行方向に較正するための正解の係数があり，それを選ぶことで尤もらしい軌跡に変換が行え，さらに以降（次のターンまで）の PDR においても同様の較正係数を用いることで測位精度の向上につながると考えている．そこで，較正係数を選択する 2 つの手法を提案する．

提案手法 1:最新の凸方形の重心

ユーザは障害物を避けたり，通路に面した店舗に立ち寄るなどの特殊なケースの時のみ通路内で左右に動き，その他は基本的に通路の中央を歩くと仮定する．そこで，最新の

© 2014 Information Processing Society of Japan

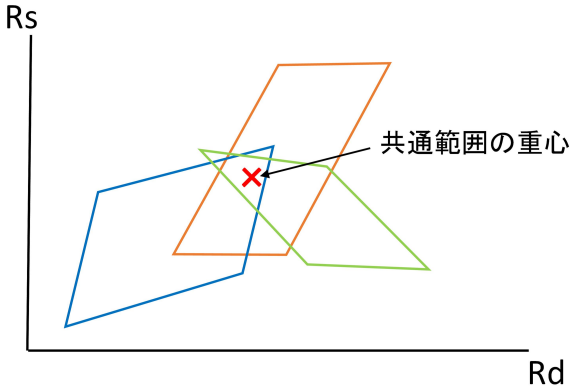

図 8　凸方形の共通範囲と重心

凸方形の重心の較正係数の組を正解の較正係数とみなし，軌跡の補正に用いる．

提案手法 2:凸方形の共通範囲の重心

ユーザの歩容は短時間で大きく変化しないと考えている．つまり，連続したターンにおいても一定の歩容で歩き続けているため，直近の凸方形に共通範囲ができると考えれる．そこで，図 8 のように連続したターンにおいて直近の凸方形が共通範囲を持っていた場合は，共通範囲の重心の較正係数の組を用いる．このような処理を繰り返し行うことで凸方形の共通範囲が狭まり，較正係数が正解に近づくと考えている．また，歩きはじめや，歩容が変わって直近の凸方形と共通範囲がない場合は手法 1 と同様に，最新の凸方形の重心を用いる．

3.7　PDR への反映

短期間で歩幅 · 進行方向の推定時の誤差率は大きく変化しないと考えられる．そこで，直前のターン間における軌跡の補正に使用した較正係数の組を PDR の歩幅推定と進行方向推定に用いる．次のターンを終えたらまた軌跡の補正が行われるため，ターンごとに較正係数が更新され，常に最新の較正係数を用いることで PDR の測位精度を向上させる．

3.8　建築構造情報

マップマッチングや軌跡の補正に必要となる建築構造情報について述べる．従来のマップマッチングを行うには交差点のノードの座標とノード間のリンク情報が必要である．また，軌跡と壁との当たり判定を行うために，壁を表す情報が必要である．そこで，隣接した交差点のエリアを表す四隅の座標を結ぶことで通路の壁を表す．このように，提案手法で必要となる情報は，各交差点のノード座標とそれを囲む四隅の座標，及びノード間のリンク情報のみであり，既存の屋内地図からのみでも十分に生成可能である．

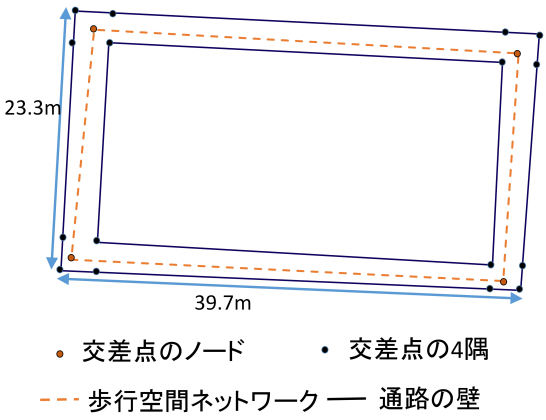

図 9　実験コース

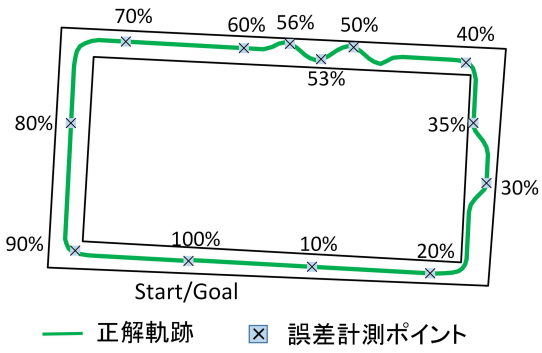

図 10　正解軌跡と誤差計測ポイント

4.　評価

立命館大学 BKC（びわこ · くさつキャンパス）の研究棟内のフロアマップを用いて，図 9 に示すように直進と交差点（右左折のみ）で構成されたコースでの建築構造情報を生成し，PDR による測位を行った．さらに，測位結果に提案手法と従来のマップマッチングを提案手法の適用し，軌跡がどのように変化するか検証を行った．

4.1　実験環境

図 10 に示すように，通路の下部からスタートし，反時計回りに 1 周するルートで検証を行った．途中通路内で直進以外にジグザグに曲がりながら進む動作を含んだルートとなっている．このルートで，PDR による測位を行い，PDR による推定軌跡，マップマッチングで歩行空間ネットワーク上に補正した軌跡，提案手法 1 による補正軌跡，提案手法 2 による補正軌跡の 4 種類の軌跡の比較を行った．さらに，図 10 で示す誤差計測ポイントにて正解座標との誤差を計測した．誤差計測ポイントは，各軌跡のルート全長の 10%，20%，...，100%と 10%ごとの地点と，それらに加え

© 2014 Information Processing Society of Japan

Vol.2014-HCI-160 No.20
Vol.2014-UBI-44 No.20
2014/10/15

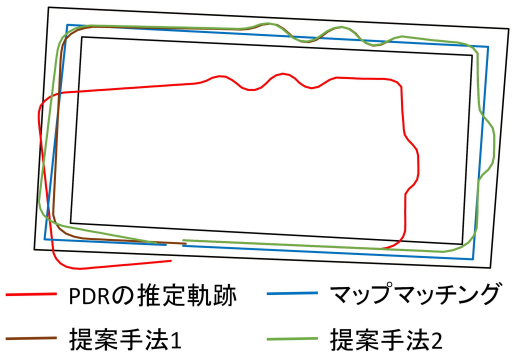

図 11　軌跡の比較

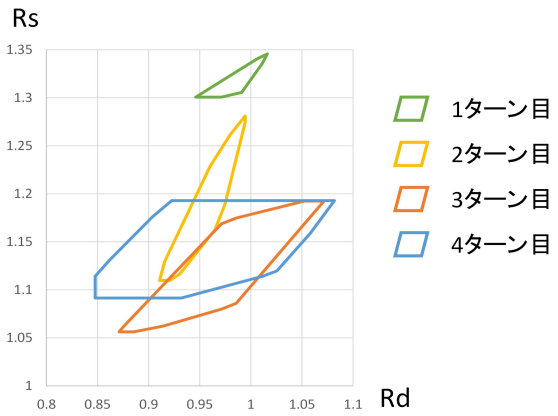

図 12　各ターンにおける凸方形

て恣意的に選んだ通路中央から外れる 35%，53%，56%地点の合計 13 か所である．

4.2　結果

PDR による推定軌跡，マップマッチングで歩行空間ネットワーク上に補正した軌跡，提案手法 1 による補正軌跡，提案手法 2 による補正軌跡の 4 パターンの軌跡を図 11 に示す．この時の提案手法 2 で用いた各ターンにおける凸方形を図 12 に示す．PDR による推定軌跡は誤差のため，通路から内側にはみ出した正解軌跡より小さめの軌跡となってる．マップマッチングを用いた軌跡は通路内に収まっているものの，通路内のジグザグな動きや交差点での緩やかな曲進が失われ，直進と急旋回のみの軌跡となっている．それに対して提案手法 1，2 によって補正を行った軌跡は通路内に収まりつつ通路内でジグザグな動きなどの軌跡の特徴も残っていることが確認できる．また，この二つの軌跡はスタートしてからしばらは重なり合っているが，3 ターン目以降徐々に離れていくのが確認できる．提案手法 2 の軌跡においては図 12 のように，ごく一部ではあるが 2 ターン目と 3 ターン目の凸方形で初めて共通範囲が出来ている．

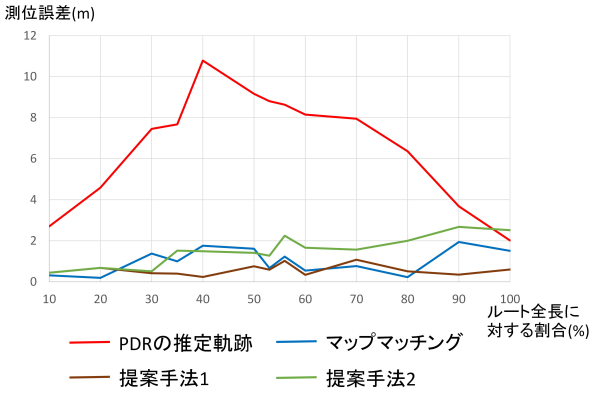

図 13　各計測ポイントでの測位誤差

表 1　測位誤差の平均・最大・最小

測位誤差 (m)	PDR	マップマッチング	提案手法 1	提案手法 2
avg	6.76	1.01	0.57	1.54
max	10.78	1.94	1.08	2.68
min	2.01	0.19	0.24	0.44

4.3　測位誤差の推移

各軌跡の誤差計測ポイントでの正解座標との誤差を図 13 に示し，それぞれの最大誤差，最小誤差，平均誤差を表 1 に示す．　PDR による推定軌跡の誤差が最も大きく，測位開始地点から徐々に誤差が大きくなり，スタート地点からほぼ対角となる 40%地点で測位誤差が最大の 10.78m となった．マップマッチングによる補正軌跡では正解軌跡と歩行空間ネットワークが重なるような部分では誤差がほとんどなく，ジグザグな動きをする場合など通路中央から外れる計測ポイントにおいても最大誤差 1.94m と道幅を超えるような誤差はなかった．提案手法 1 が最も安定しており，ほとんどの地点で誤差 1m 以内をに収まっており，平均誤差も 0.57m となった．提案手法 2 では距離を重ねるごとに徐々に測位誤差が大きくなり，100%地点では誤差 2.68m と 4 種類の軌跡の中でも最も測位誤差が大きかった．

4.4　考察

4.4.1　マップマッチングと提案手法の比較

図 11 を見る限りでは従来のマップマッチングより提案手法 1，2 の方が動きの特徴を軌跡に残せている分尤もらしい軌跡に近いように見える．しかし，測位誤差の推移を見る限りでは提案手法とそれほど大きな差はなく，35%，53%，56%地点といった正解軌跡が通路中央から外れるような地点においても，それほど大きな誤差は見られなかった．これは，そもそも通路の道幅が 2〜3m と狭く，通路内の移動経路によって発生する誤差が小さいことが原因だと考えられる．今後，道幅の広い通路や広場を含んだコースでの実験を行うことで提案手法の優位性を示せるのではないかと考えている．

4.4.2　提案手法 1 と 2 の比較

単純に 1 回の凸方形の重心を用いて道の中央に寄せる提

© 2014 Information Processing Society of Japan

案手法 1 より，複数回の凸方形を利用する分提案手法 2 の方がいい結果になると予想していたが，実際は提案手法 1 の方が測位精度が高くなった．この原因として，図 12 で示すように凸方形がうまく重ならなかったことが挙げられる．あるターン間における Rd，Rs の取り得る範囲というのはターン間のユーザの歩容によっても変動する．提案手法 2 はユーザの歩容が短期間では大きく変わらないという前提に基づいた手法なので，今回のような様々な動きを含んだルートでは歩容が一定でなかったと考えられる．また，歩容が一定でない場合でも偶然凸方形同士が重なることもあり，今回のようにごく一部だけ共通範囲ができる場合が考えれらる．凸方形の共通範囲がごく一部であるということは，それぞれの凸方形にとっても範囲ぎりぎりの較正係数ということである．つまり，道の中央から外れた移動軌跡に補正されることになり，これが原因で提案手法 1 が提案手法 2 より優れた結果になったと考えている．しかし，正解の較正係数が毎回凸方形の重心であるとは考えにくいため，今後は凸方形の中から正しい較正係数を選択するための新たな手法について検討していく必要がある．

5. まとめ

本稿では，PDR の測位精度向上のため建築構造情報を用いた PDR 軌跡補正手法を提案し，実際に提案手法の有用性を確かめる検証を行った．その結果，従来 PDR の補正に活用されてきたマップマッチングと比較しても，提案手法の方がユーザの実際の軌跡の特徴を残した補正ができるという点で有用であると示せた．また，測位精度に関しても，PDR による推定軌跡に提案手法 2 を適用することで平均誤差が 6.76m から 0.57m まで向上した．このように，建築構造情報を用いることで PDR の軌跡を補正することに成功し，高精度な屋内測位の実現に貢献したといえる．

今回は提案手法の有用性を確かめるための簡易なコースでの検証であったが，今後は様々なパターンのコースで正解データを用いた検証を行い，測位精度の推移について評価を行いたい．具体的には道幅の広い通路や，広場での活用への対応，人混みがあるような実環境を含んだルートでの実験を行うことで提案手法の今後の実用性を確かめる．さらに，軌跡の尤もらしさについてもユーザへのアンケートを用いることで，ナビゲーションなどに活用する上でユーザにとって分かりやすさについても定性的な評価を行うつもりである．また，ユーザの歩容の変化についても調査し，凸方形の中から正しい較正係数を選択する手法についても再度検討したい．

参考文献

[1] Tran Xuan Duc, 宮崎和哉, 西尾信彦: 無線 LAN 位置マーカ方式測位への状況適応型測位手法, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム, pp.1017–1026 (2012).
[2] 秋山高行, 鴨志田亮太, 林 秀樹, 佐藤暁子: 歩行の始点終点座標と建物外形を利用した屋内歩行軌跡推定方式の提案と評価, 情報科学技術フォーラム講演論文集 11(4), pp.379–386 (2012).
[3] 上坂大輔, 村松茂樹, 岩本健嗣, 横山浩之: 手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案, 情報処理学会論文誌, Vol.52, pp.558–570 (2011).
[4] 山崎昌廣, 佐藤陽彦: ヒトの歩行 : 歩幅, 歩調, 速度およびエネルギー代謝の観点から <総説>, 人類学雑誌 98(4), pp.385–401 (1990).
[5] 翁長謙良, 吉永安俊, 趙 廷寧: 身長と歩幅の相関に関する一考察 : 学生の歩測の事例から, 琉球大学農学部学術報告, Vol.45, pp.149–155 (1998).
[6] 三宅孝幸, 新井イスマイル: 時間帯と同行者の状況変化に追従した歩幅推定手法の提案と評価, 研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL), 2013-MBL-65, pp.1–7 (2013).
[7] 田川達司, 内匠 逸, 打矢隆弘: カルマンフィルタとマップマッチングを用いた歩行者経路の推定精度向上に関する研究, 全国大会講演論文集 2013(1), pp.207–209 (2013).
[8] Shun Yoshimi, Takuya Azumi, and Nobuhiko Nishio.: PDR-based Adaptation for User-Progress in Interactive Navigation System, In Proceedings of the 2013 ACM Conference on Ubiquitous Computing, UbiComp'13, ACM (2013).
[9] 石塚宏紀, 上坂大輔, 黒川茂莉, 渡邉孝文, 村松茂樹, 小野智弘: BLE シグナルと PDR によるハイブリッド屋内測位手法の基礎検討 〜Open Beacon Field Trial 参加における実験結果の共有〜, 研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL), 2014-MBL-71, pp.1–6 (2014).
[10] Sotiris Brakatsoulas, Dieter Pfoser, Randall Salas, and Carola Wenk.: On Map-Matching Vehicle Tracking Data, Very Large Data Bases (VLDB) Conference, VLDB 31st, pp.853–864 (2005).
[11] Chiraz BenAbdelkader, Ross Cutler, and Larry Davis.: Stride and Cadence as a Biometric in Automatic Person Identification and Verification, Automatic Face and Gesture Recognition (FGR 2002), Proc. FGR2002, IEEE Computer Society, p.372 (2002).

© 2014 Information Processing Society of Japan